

滴灌与沟灌对杨树细根空间分布的影响

秘洪雷¹, 兰再平², 彭晶晶², 马鑫²

(1. 天津泰达盐碱地绿化研究中心有限公司, 天津 300457; 2. 中国林业科学研究院, 北京 100091)

摘要: 【目的】探究不同灌溉方式对杨树 *Populus* 细根生长和分布的影响, 为滴灌培育人工林提供理论和技术依据。

【方法】以 5 年生欧美杨 107 *Populus × euramericana* ‘Neva’ 为研究对象, 在滴灌和沟灌栽培的人工林中选取标准木, 分别在株间、对角和行间方向距树干 20、50、100 和 150 cm 处采用根钻法取样, 比较其细根生物量密度、细根根长密度、细根比根长的差异。【结果】滴灌条件下株间方向的细根生物量密度与沟灌的差异随水平距离增加而增大 ($P < 0.05$), 对角和行间方向随水平距离增加其差异减小。滴灌下细根生物量密度在株间方向距树干 50 cm 处最大, 对角和行间方向在距树干 20 cm 处最大。滴灌下株间方向的细根根长密度与沟灌的差异随水平距离增加而增大 ($P < 0.05$), 对角和行间方向的差异随水平距离增加而减小。滴灌下细根根长密度在株间方向距树干 50 cm 处最大, 对角和行间方向在距树干 20 cm 处最大。滴灌和沟灌下 0~40 cm 土层的细根生物量分别占 0~60 cm 土层的 81% 和 73%, 细根根长分别占 0~60 cm 土层的 85% 和 80%。滴灌和沟灌下的比根长随水平距离增加而增大, 且均表现为沟灌大于滴灌, 不同方向比根长的差异在距树干 20 cm 处最大, 在距树干 50 cm 处最小。【结论】滴灌能促进杨树人工林细根的生长和周转, 影响细根的空间分布, 提高林地生产力。图 4 表 1 参 28

关键词: 滴灌; 沟灌; 杨树; 细根; 空间分布

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2021)06-1136-08

Effects of drip irrigation and furrow irrigation on spatial distribution of fine roots of *Populus*

BI Honglei¹, LAN Zaiping², PENG Jingjing², MA Xin²

(1. Tianjin TEDA Saline Land Greening Research Center Co. Ltd, Tianjin 300457, China; 2. Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the effects of different irrigation methods on the growth and spatial distribution of fine roots of *Populus*, so as to provide theoretical and technical basis for the cultivation of plantation by drip irrigation. [Method] The 5-year old ‘107’ *Populus × euramericana* ‘Neva’ was selected as the research object, and standard trees were selected from the plantations cultivated by drip irrigation and furrow irrigation. Root drills were used to sample trees at 20, 50, 100 and 150 cm from tree trunks in the directions of inter plant, diagonal and inter row. The differences of fine root biomass density, fine root length density and fine root specific root length were compared. [Result] In inter plant direction, the difference of fine root biomass density between drip irrigation and furrow irrigation increased with the increase of horizontal distance, and the difference was significant ($P < 0.05$). With the increase of horizontal distance, the differences between diagonal and inter row directions decrease. Under drip irrigation, the fine root biomass density was the highest at 50 cm away from the trunk in the direction of inter plant, and the highest at 20 cm

收稿日期: 2021-01-04; 修回日期: 2021-06-16

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (CAFYBB2018MB012)

作者简介: 秘洪雷 (ORCID: 0000-0002-1806-8447), 从事逆境植物选育研究。E-mail: bihonglei1990@126.com。通信

作者: 兰再平 (ORCID: 0000-0002-1055-5283), 研究员, 从事森林培育与森林生态学研究。E-mail: wboffice@caf.ac.cn

away from the trunk in the direction of diagonal and inter row. Under drip irrigation, the difference of fine root length density with furrow irrigation increased with the increase of the horizontal distance ($P < 0.05$), while the difference of diagonal and row direction decreased with the increase of the horizontal distance. Under drip irrigation, the root length density of fine roots was the largest at 50 cm from the trunk in the direction of inter plant, and the largest at 20 cm away from the trunk in the direction of diagonal and inter row. Under drip and furrow irrigation, the fine root biomass of 0–40 cm soil layers accounted for 81% and 73% of that in 0–60 cm soil layers, respectively, while the fine root length accounted for 85% and 80%. The specific root length under drip irrigation and furrow irrigation increased with the increase of horizontal distance, and the difference of specific root length under furrow irrigation was greater than that under drip irrigation. The difference of specific root length in different directions was the largest at 20 cm away from the trunk and the smallest at 50 cm away from the trunk. [Conclusion] Drip irrigation can promote the growth and turnover of fine roots, affect their spatial distribution, and improve forest productivity. [Ch, 4 fig. 1 tab. 28 ref.]

Key words: drip irrigation; furrow irrigation; *Populus*; fine roots; spatial distribution

杨树 *Populus* 为中国重要的速生丰产林造林树种, 其中欧美杨 107 *Populus × euramericana* ‘Neva’ 因其材性好、干型美、抗性强和产量高等特点, 在中国淮河、黄河流域及辽河流域以南等地区广泛栽植。灌溉是欧美杨人工林生产力维持的重要技术措施, 滴灌可根据植物需水规律及时补充根部水分, 显著促进林木生长, 获得较高的经济效益和生态效益^[1–3], 该技术在国外的人工林培育方面已有较广泛的应用^[4–5]。近年来, 国内关于滴灌栽培人工林的研究也相继开展。贺勇等^[6]研究发现: 滴灌栽培条件下 2、3 年生欧美杨 107 幼龄林的蓄积量分别为沟灌的 2.22 和 1.68 倍。席本野等^[7]研究指出: 滴灌使 6、7 年生的毛白杨 *Populus tomentosa* 林分生产力分别较不灌溉平均提高了 24% 和 28%。根系分布和形态特征反映了植物对土壤资源的利用状况, 通常认为直径小于 2 mm 的细根是根系吸收功能的重要部分^[8]。细根的生长和分布受树木自身生长特性、土壤的水养条件、温湿度及其他外界环境条件的影响^[9–12], 其分布也可以反映土壤中水分营养的分配格局^[13] 及地下部分对土壤资源的利用程度^[14–15], 这将直接影响林木地上部分的生长和生态效益的发挥^[16]。滴灌可以大幅度提高根系数量, 影响根系的分布特征^[17–18], 改善土壤条件^[19], 提高林地生产力^[6–7]。但以往开展滴灌对林木细根的研究, 多采用距树干特定距离或随机取样的方法, 不能在空间维度反映细根的分布特征。本研究以滴灌和沟灌栽培的 5 年生欧美杨 107 为研究对象, 对比分析在不同的取样方向、水平距离和土壤深度上细根的空间分布特征, 探究不同灌溉方式对细根生长和分布的影响, 为河流故道沙地等干旱地区人工林的灌溉调控和合理经营提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究地位于北京市大兴区林场, 处于永定河故道沙地 (39°26′~39°51′N, 116°13′~116°43′E)。该区属暖温带半湿润大陆性季风气候, 年均气温为 11.6 °C, 年均降水量为 550 mm, 年均蒸发量为 1 100 mm, 无霜期为 180~200 d。土壤为永定河故道冲积沙土, 地下水位深为 36 m, 土壤容重为 (1.46±0.15) g·cm⁻³, 田间持水量为 10%, 蓄水能力差, 土壤碱解氮质量分数为 25.65 mg·kg⁻¹, 速效磷质量分数为 2.36 mg·kg⁻¹, 速效钾质量分数为 22.12 mg·kg⁻¹, 有机质质量分数为 1.50 g·kg⁻¹, 从地表向地下 1.2 m 处均无明显腐殖质层。

1.2 试验设计

以 5 年生欧美杨 107 人工林为研究对象。该林分于 2011 年利用滴灌技术扦插造林, 株行距 3 m×5 m, 滴头流量为 4 L·h⁻¹, 滴头间距为 60 cm, 滴灌管沿株间铺设。结合土壤湿度传感器, 于每年的 5–9 月, 当 20 cm 土层土壤相对含水量低于 60% 时进行灌溉, 灌溉量由灌溉时长控制, 每次灌溉量为 6~9 mm, 灌溉总量为 250 mm。滴灌后能在株间方向形成宽度为 1.0~1.2 m, 深度为 60~70 cm 的连续湿润带^[19]。沟灌栽培的试验林于 2012 年造林成活后撤去滴灌管, 沿株间方向挖宽 1 m、深 15 cm 的灌溉沟进行灌溉。

灌溉量由流量计控制, 每次灌溉量为 50 mm, 春季、秋季各灌溉 1 次, 夏季 3 次, 灌溉总量为 250 mm。

1.3 取样与测定

于 2015 年 10 月下旬, 分别在滴灌和沟灌栽培的试验林内设置 3 个面积为 30 m×20 m 的标准地, 每个标准地内有样木 40 株, 在各标准地内每木检尺后选取 1 株标准木作为研究对象 (表 1)。取样采用根钻法, 根钻内径 10 cm, 高 10 cm, 以样木树干为中心, 分别选取株间、行间和对角 3 个方向距树干 20、50、100、150 cm 处钻取土芯, 取样深度为 60 cm, 每 10 cm 为 1 个土层。具体取样点位如图 1 所示, 共计 432 个土样分别装入标号的塑封袋后带回实验室。

将土样在清水中浸泡后, 过 0.8 mm 孔径筛冲洗, 分离土样中的根系并用镊子捡取所有活根系。按照传统的根系分类标准^[20], 以直径≤2 mm 作为划分细根的阈值, 应用 Epson Twain Pro 根系扫描系统和 WinRhizo 根系图像分析系统测定细根长 (m); 将细根在 80 ℃ 烘箱中烘干至恒量 (24 h), 用电子天平 (精确到 0.001 g) 测定细根生物量 (g)。

1.4 指标计算

细根生物量密度 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) = $M_{\text{土芯}}/V_{\text{土芯}}$, 细根根长密度 ($\text{m} \cdot \text{m}^{-3}$) = $L_{\text{土芯}}/V_{\text{土芯}}$, 比根长 ($\text{m} \cdot \text{g}^{-1}$) = $L_{\text{土芯}}/M_{\text{土芯}}$ 。其中: $M_{\text{土芯}}$ 为土芯内细根质量 (g), $L_{\text{土芯}}$ 为土芯内细根长 (m), $V_{\text{土芯}}$ 为土芯内土壤体积 (m^3)。 $V_{\text{土芯}} = \pi r^2 h 10^{-6}$, 其中 r 为根钻半径, 取值 5 cm, h 为根钻高度, 取值 10 cm。

1.5 数据处理

利用 Excel 和 SPSS 19.0 对数据进行统计分析, 分别以同一水平距离处不同土层细根指标的累加值作为该水平距离处的细根特征值, 采用单因素方差分析比较同一灌溉方式下细根的空间分布特征, 采用 t 检验分析不同灌溉方式下同一水平距离处的细根分布特征。

2 结果与分析

2.1 不同灌溉方式下细根生物量密度空间分布特征

滴灌和沟灌条件下细根生物量密度的分布特征如图 2 所示。株间方向 (图 2A), 滴灌条件下距树干 20、50、100 和 150 cm 处的细根生物量密度分别是沟灌的 2.55、2.95、3.17 和 3.91 倍 ($P < 0.05$), 且随水平距离增加差异增大; 滴灌和沟灌条件下距树干 20 和 50 cm 处的细根分布较多, 细根生物量密度差异不显著, 但均显著高于距树干 100 和 150 cm 处的细根生物量密度 ($P < 0.05$)。对角方向 (图 2B), 滴灌条件下距树干 20、50、100 和 150 cm 处的细根生物量密度分别是沟灌的 2.42、1.56、1.36 和 1.10 倍, 随水平距离的增加差异减小; 滴灌条件下细根生物量密度在距树干 20 cm 处最大, 为 $2\ 014.77 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 然后随水平距离增加显著减小 ($P < 0.05$); 沟灌条件下距树干 20 和 50 cm 处的细根生物量密度分别为 832.25 和 $733.35 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 差异不显著, 但均显著高于距树干 100 和 150 cm 处的细根生物量密度 ($P < 0.05$)。行间方向 (图 2C), 滴灌和沟灌条件下细根生物量密度差异的分布特征与对角方向相同, 在距树干 20 cm 处差异最大 ($P < 0.05$), 然后随水平距离的增加不断减小; 滴灌和沟灌条件下细根生物量密度均在距树干 20 cm 处最大, 分别为 $1\ 707.73$ 和 $631.25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$, 然后随水平距离的增加显著减小 ($P < 0.05$)。由此可知, 滴灌和沟灌条件下的细根均呈沿灌溉方向为长轴的半椭球状分布, 滴灌条件下细根分布的椭球体大于沟灌, 且扁率大于沟灌。

滴灌和沟灌条件下细根生物量密度在不同土层的分布差异明显。滴灌条件下株间方向 (图 2A), 距

表 1 标准木基本特征

样木 编号	滴灌			沟灌		
	胸径/cm	树高/m	冠幅/m	胸径/cm	树高/m	冠幅/m
1	15.6	17.26	3.63×3.42	13.4	15.24	3.12×2.57
2	15.8	16.87	3.13×3.50	13.6	15.86	3.03×2.61
3	15.8	17.63	3.35×3.17	13.4	15.47	3.07×2.70

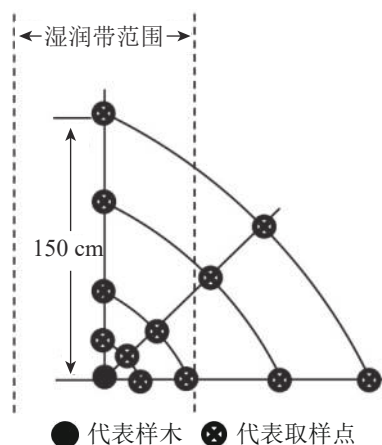


图 1 根系取样示意图

Figure 1 Sampling positions of fine roots

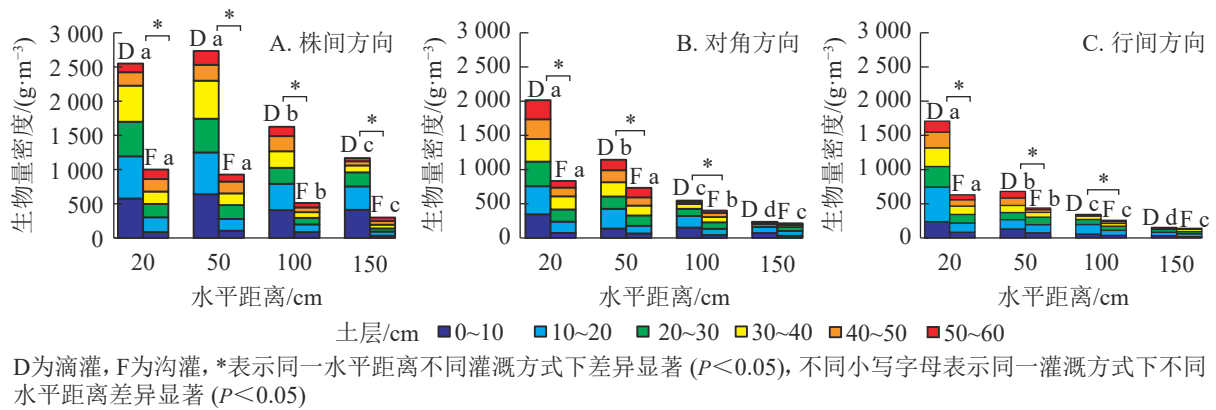


图 2 细根生物量密度的空间分布特征

Figure 2 Spatial distribution characteristics of fine root biomass density

树干 20 cm 处的细根生物量密度随土层加深呈先增大后减小的分布特征, 10~20 cm 土层细根生物量密度最大, 距树干 50、100 和 150 cm 处的细根生物量密度均在 0~10 cm 土层最大, 然后随土层加深不断减小, 不同水平距离处细根生物量密度均在 40~50 cm 土层减小明显; 对角和行间方向 (图 2B, 图 2C) 不同水平距离处的细根生物量密度均在 10~20 cm 土层最大, 随土层呈先增大后减小的垂直分布特征。沟灌条件下, 在株间、对角和行间方向的不同水平距离处, 细根生物量密度在 10~30 cm 土层最大, 随土层呈先增大后减小的垂直分布特征, 0~10 cm 土层细根生物量密度较小。

2.2 不同灌溉方式下细根根长密度空间分布特征

滴灌和沟灌条件下细根根长密度的分布特征如图 3 所示。株间方向 (图 3A), 滴灌条件下距树干 20、50、100 和 150 cm 处的细根根长密度分别是沟灌的 1.37、1.52、2.42 和 4.40 倍 ($P<0.05$), 且随水平距离的增加差异增大; 滴灌和沟灌条件下细根根长密度均在距树干 50 cm 处最大, 分别为 42 102.00 和 19 372.16 m·m⁻³, 表现出先增大后减小的水平分布特征, 其中滴灌条件下距树干 50 cm 处的细根根长密度分别是距树干 20、100、150 cm 处的 1.29、1.49 和 1.72 倍 ($P<0.05$); 而沟灌条件下距树干 50 cm 处的细根根长密度是距树干 20 cm 处的 1.04 倍, 差异不显著, 是距树干 100 和 150 cm 处的细根根长密度的 1.48 和 2.18 倍 ($P<0.05$)。对角方向 (图 3B), 滴灌条件下距树干 20 cm 处的细根根长密度是沟灌的 1.57 倍, 差异最大 ($P<0.05$), 然后随水平距离增加而差异减小, 在距树干 150 cm 处, 滴灌条件下的细根根长密度小于沟灌, 但差异不显著; 滴灌和沟灌条件下的细根根长密度均表现出随水平距离增加不断减小的水平分布特征, 在距树干 20 cm 处最大, 分别为 26 670.71 和 17 025.94 m·m⁻³, 均与距树干 50 cm 处差异不显著, 与距树干 100 和 150 cm 处差异显著 ($P<0.05$)。行间方向 (图 3C), 滴灌和沟灌条件下细根根长密度差异的分布特征与对角方向相同, 距树干 20 cm 处滴灌条件下的细根根长密度显著大于沟灌 ($P<0.05$), 然后随水平距离增加差异减小, 滴灌条件下距树干 150 cm 处的细根根长密度小于沟灌, 且

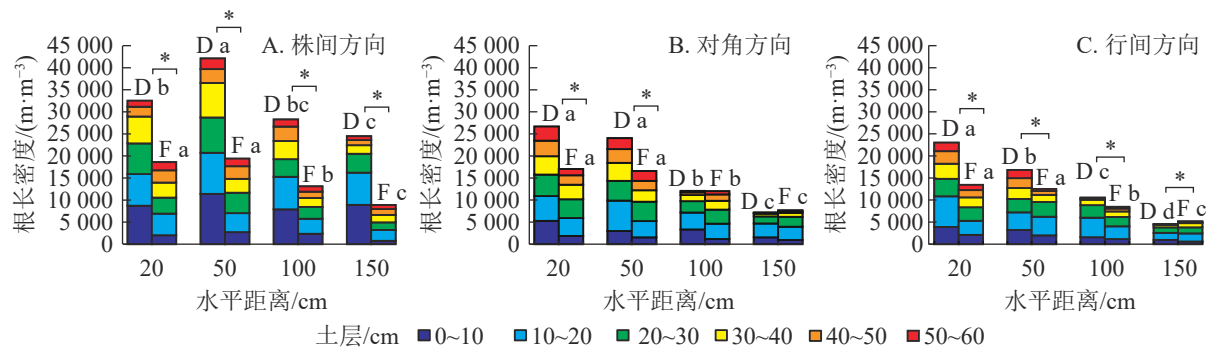


图 3 细根根长密度的空间分布特征

Figure 3 Spatial distribution characteristics of fine root length density

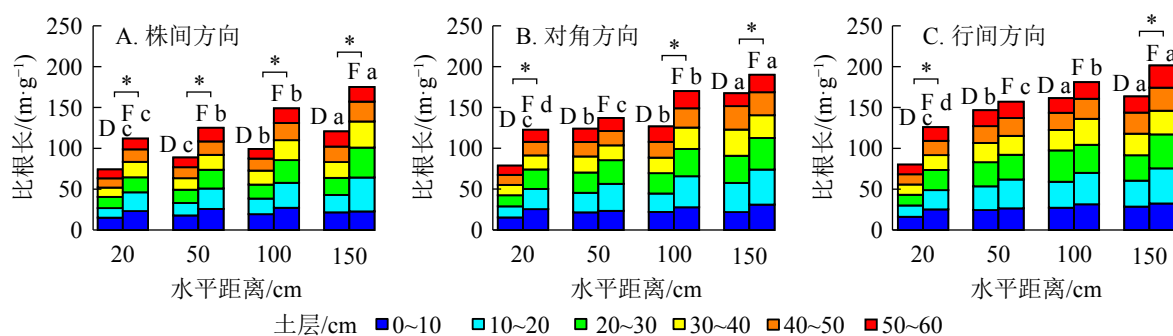
差异显著 ($P<0.05$)；滴灌条件下距树干 20 cm 处的细根根长密度为 $23\,003.91\text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$ ，随水平距离的增加显著减小 ($P<0.05$)，沟灌条件下距树干 20 cm 处的细根根长密度为 $13\,444.44\text{ m}\cdot\text{m}^{-3}$ ，是距树干 50 cm 处的 1.07 倍，差异不显著，与距树干 100 和 150 cm 处的细根根长密度差异显著 ($P<0.05$)。

滴灌条件下的株间方向 (图 3A)，不同水平距离处的细根根长密度均在 0~10 cm 土层最大，然后随土层加深不断减小，在 40~50 cm 土层减小明显；对角和行间方向 (图 3B，图 3C) 不同水平距离处细根根长密度随土层加深表现出先增大后减小的分布特征，10~20 cm 土层的细根根长密度最大。沟灌条件下，株间、对角和行间方向的细根根长密度均呈先增大后减小的垂直分布特征，不同水平距离处细根根长密度的最大值出现在 10~30 cm 土层。

2.3 不同灌溉方式下细根比根长空间分布特征

与细根生物量密度和细根根长密度的分布特征不同，比根长在不同方向的不同水平距离处均表现为沟灌大于滴灌。株间方向 (图 4A)，沟灌条件下不同水平距离处的比根长均显著高于滴灌 ($P<0.05$)，在距树干 20 cm 处差异最大，是滴灌的 1.51 倍，距树干 50 cm 处的差异最小，是滴灌的 1.41 倍；对角方向 (图 4B)，沟灌和滴灌条件下比根长在距树干 20 cm 处的差异最大 ($P<0.05$)，距树干 50 cm 处最小且差异不显著；行间方向 (图 4C)，比根长的水平分布特征与对角方向类似，距树干 20 cm 处差异最大 ($P<0.05$)，距树干 50 cm 处差异最小且不显著。滴灌条件下，比根长在不同方向均表现出随水平距离增加而增大的水平分布特征，沟灌条件下比根长的水平分布特征与滴灌相同。以株间方向 (图 4A) 为例，滴灌条件下距树干 150 cm 处的比根长最大，为 $120.74\text{ m}\cdot\text{g}^{-1}$ ，分别是距树干 20、50、100 cm 处的 1.63、1.36 和 1.22 倍 ($P<0.05$)；沟灌条件下比根长的最大值也在距树干 150 cm 处，为 $175.07\text{ m}\cdot\text{g}^{-1}$ ，分别是距树干 20、50、100 cm 处的 1.56、1.40 和 1.18 倍 ($P<0.05$)。在不同方向，沟灌条件下比根长大于滴灌且表现出随水平距离先减小后增加的水平分布特征，这说明土壤水分条件是影响比根长的重要因素。

由图 4 可知：在株间、对角和行间方向距树干 20 cm 处的 0~10 cm 土层中，沟灌条件下的比根长分别是滴灌的 1.53、1.67 和 1.55 倍，差异明显。在各方向的不同水平距离处，10~20 cm 土层的比根长也与滴灌有较大差异，尤其以株间方向 (图 4A) 最大。在距树干 20、50、100 和 150 cm 处，沟灌条件下 10~20 cm 土层的比根长分别是滴灌的 1.97、1.65、1.60 和 1.96 倍，其差异明显大于其他土层。



D为滴灌，F为沟灌。*表示同一水平距离不同灌溉方式下差异显著 ($P<0.05$)，不同小写字母表示同一灌溉方式下不同水平距离差异显著 ($P<0.05$)

图 4 细根比根长的空间分布特征

Figure 4 Spatial distribution characteristics of fine specific root length

3 讨论

滴灌对细根生物量密度影响显著。与沟灌相比，滴灌对细根生物量密度的促进作用主要集中在株间方向以及对角和行间方向距树干 50 cm 的范围内，这与滴灌后形成湿润带范围基本一致，说明土壤水分条件是影响细根生物量积累的重要因素。杨秀云等^[21]研究指出：土壤含水量与细根生物量呈显著的正相关关系，土壤水分是影响林木细根分布的重要因素，这与本研究的结果一致，土壤的水分条件在一定程度上影响细根的空间分布格局。本研究表明：滴灌和沟灌条件下 0~40 cm 土层的细根生物量分别占 0~60 cm 土层的 81% 和 73%，细根在 0~40 cm 土层分布集中，这与闫小莉等^[22]、闫美芳等^[23]关于细根垂直分布特征的研究结论一致，说明滴灌没有改变细根在垂直方向的分布范围，滴灌对细根生物量的促进作用主

要在于量的增加。滴灌条件下株间方向的细根生物量密度在垂直方向表现为表土层最大, 对角和行间方向细根生物量密度随土层加深先增大后减小的垂直分布特征与沟灌一致, 滴灌改变了株间方向细根生物量在不同土层的积累特征, 说明土壤水分条件影响细根的垂直分布。滴灌条件下细根生物量密度在株间、对角和行间方向的水平分布特征与沟灌条件下的细根在不同方向的水平分布特征一致, 说明滴灌能促进细根生物量的积累, 但未能改变其在水平方向的分布规律, 环境条件是影响细根生长和周转的重要因素。这也与杨秀云等^[24]关于细根生物量水平分布格局的研究结果一致, 但与谢明明等^[25]对板栗 *Castanea mollissima* 细根水平分布特征的研究结果不同。这可能是受树种本身遗传特性的影响。

滴灌对细根根长密度的影响主要在株间方向以及对角和行间方向距树干 50 cm 的范围内, 这与滴灌对细根生物量密度影响的范围一致。滴灌条件下湿润带范围内的细根根长密度均显著高于沟灌, 滴灌对细根根长的促进作用明显, 土壤的水分条件显著影响细根的生长^[21]。滴灌和沟灌条件下不同水平距离处 0~40 cm 土层的细根根长占有所有土层比例分别为 85% 和 80%, 说明 0~40 cm 土层是细根在垂直方向的集中分布范围^[22-23], 这也说明细根的分布范围受林木自身生长调控。滴灌条件下, 株间方向细根根长密度随土层不断减小, 而对角和行间方向细根根长密度的垂直分布与沟灌条件下细根根长密度随土层加深先增大后减小的分布特征一致, 说明滴灌改变了细根根长在株间方向的垂直分布特征。对角和行间方向, 滴灌条件下细根根长密度的水平分布特征与沟灌一致, 均随水平距离的增大而减小, 而在株间方向, 滴灌条件下细根根长密度表现出先增加后减少的分布特征, 与沟灌条件下细根根长密度的水平分布差异显著, 说明细根根长受灌溉方式的影响大于细根生物量, 滴灌改变了细根根长在株间方向的分布特征, 水分条件是影响细根根长的重要因素。

比根长是表征细根生理功能与形态特征的重要指标, 可以指示根系生理活性的大小, 能反映根系的生理功能和吸收能力^[26]。不同灌溉方式对细根比根长影响显著, 沟灌条件下不同水平距离处的比根长均大于滴灌, 这说明常规灌溉条件下单位质量的细根吸收水分和养分的能力大于滴灌。与滴灌相比, 沟灌条件下细根分布较少, 要满足林木生长需求就要以尽可能少的细根投入获得尽可能多的水分, 进而造成了比根长的差异。不同灌溉方式下比根长的差异随水平距离的增大先减小后增加, 这可能是受不同灌溉方式下细根分布量差异的影响, 滴灌条件下的细根分布显著高于沟灌, 加上较高的灌溉频率, 改善了土壤水分、温度等条件, 细根系统吸收的水分营养满足林木的生长需求, 造成了单位质量细根吸收能力的差异。比根长随水平距离增大的趋势与甘雅文等^[27]的研究结果一致, 这是受林木自身生长特性的影响。

细根生长受土壤资源有效性的影响^[15, 28]。滴灌条件下细根生物量和根长与沟灌的差异, 是受不同灌溉方式下土壤资源异质性的影响。在河流故道沙地的立地条件下, 滴灌由于较高的灌溉频率使表土层保持湿润的状态, 改变了土壤的水分、温度等条件, 有利于细根的生长和周转, 同时适宜的土壤温度和水分的也有助于林地内凋落物的分解, 进而改善土壤条件, 进一步促进细根分布和积累。本研究中, 滴灌条件下林木的平均胸径为 15.70 cm, 平均树高为 17.28 m, 分别是沟灌的 1.17 和 1.11 倍, 滴灌栽培条件下的林木蓄积量比沟灌高 $28.5 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 。滴灌条件下杨树人工林更多的细根分布, 可以更充分地利用土壤资源, 吸收水分营养, 进而促进林木生长, 提高林地生产力。

4 结论

滴灌对杨树人工林细根生长和积累的促进作用明显, 尤其在湿润带范围内对细根量的促进作用显著。滴灌条件下铺设滴灌管的株间方向细根呈先增加后减少的水平分布特征, 在距树干 50 cm 处分布最多, 与沟灌条件下细根随水平距离增大而减少的分布特征不同。对角和行间方向细根分布与沟灌相同, 在距树干 20 cm 处分布最多, 然后随水平距离的增加而减少。滴灌条件下细根在 0~40 cm 土层分布集中, 滴灌没有改变细根在垂直方向的分布范围, 但改变了株间方向细根的垂直分布特征。随水平距离增大, 滴灌和沟灌条件下的细根比根长均不断增大, 其差异在距树干 20 cm 处最大, 然后呈先减小后增加的分布特征。滴灌能明显改善河流故道沙地的土壤条件, 提高土壤资源有效性, 促进细根的生长和周转, 进而提高林地生产力。

5 参考文献

- [1] 司婧, 贾黎明, 韦艳葵, 等. 地下滴灌对杨树速生丰产林碳储量的影响[J]. 北京林业大学学报, 2012, **34**(1): 14–18.
SI Jing, JIA Liming, WEI Yankui, *et al.* Carbon storage in fast-growing and high-yield poplar plantations under subsurface drip irrigation [J]. *J Beijing For Univ*, 2012, **34**(1): 14–18.
- [2] 秦杏宇, 吕馥龄, 彭晶晶, 等. 滴灌与沟灌栽培杨树人工林土壤水分动态与生产力[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(5): 1535–1542.
QIN Xingyu, LÜ Fuling, PENG Jingjing, *et al.* Soil moisture dynamics and productivity of poplar plantations under drip and furrow irrigation managements [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2020, **31**(5): 1535–1542.
- [3] 王梓, 马履一, 贾忠奎, 等. 滴灌下欧美 107 杨苗高水肥耦合效应[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(1): 29–34.
WANG Zi, MA Lüyi, JIA Zhongkui, *et al.* Interaction of water and fertilizer on seedling height for first-year growth *Populus×euramericana* ‘74/76’ with drip irrigation [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2012, **29**(1): 29–34.
- [4] MUSSELMAN R C. *Response of Transplanted Aspen to Drip Irrigation on Reclaimed Mine Lands*[D]. Fort Collins: Colorado State University, 2007.
- [5] O’NEILL M K, SHOCK C C, LOMBARD K A, *et al.* Hybrid poplar (*Populus* spp.) selections for arid and semi-arid intermountain regions of the western united states [J]. *Agrofor Syst*, 2010, **79**(3): 409–418.
- [6] 贺勇, 兰再平, 孙尚伟, 等. 地面滴灌对 107 杨幼林生长和水肥利用的影响[J]. 东北林业大学学报, 2015, **43**(11): 37–41.
HE Yong, LAN Zaiping, SUN Shangwei, *et al.* Effects of drip irrigation on the growth and use efficiency of water and fertilizer of Young ‘107’ poplar plantation [J]. *J Northeast For Univ*, 2015, **43**(11): 37–41.
- [7] 席本野, 王焯, 邸楠, 等. 地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(17): 5318–5329.
XI Benye, WANG Ye, DI Nan, *et al.* Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of *Populus tomentosa* pulpwood plantation under subsurface drip irrigation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(17): 5318–5329.
- [8] GORDON W S, JACKSON R B. Nutrient concentrations in fine roots [J]. *Ecology*, 2000, **81**(1): 275–280.
- [9] 薛建辉, 王智, 吕祥生. 林木根系与土壤环境相互作用机制研究综述[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2002, **26**(3): 79–84.
XUE Jianhui, WANG Zhi, LÜ Xiangsheng. Progress on the interaction between tree roots and soil environment [J]. *J Nanjing For Univ Sci Ed*, 2002, **26**(3): 79–84.
- [10] SCHENK H J. Vertical vegetation structure below ground: scaling from root to globe [J]. *Prog Bot*, 2005, **66**(4): 341–373.
- [11] 黄林, 王峰, 周立江, 等. 不同森林类型根系分布与土壤性质的关系[J]. 生态学报, 2012, **32**(19): 6110–6119.
HUANG Lin, WANG Feng, ZHOU Lijiang, *et al.* Root distribution in the different forest types and their relationship to soil properties [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(19): 6110–6119.
- [12] 杨秀云, 韩有志, 张芸香, 等. 采伐干扰对华北落叶松细根生物量空间异质性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(1): 64–73.
YANG Xiuyun, HAN Youzhi, ZHANG Yunxiang, *et al.* Effects of cutting disturbance on spatial heterogeneity of fine root biomass of *Larix principis-rupprechtii* [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(1): 64–73.
- [13] 张宇清, 朱清科, 齐实, 等. 梯田埂坎立地植物根系分布特征及其对土壤水分的影响[J]. 生态学报, 2005, **15**(3): 500–506.
ZHANG Yuqing, ZHU Qingke, QI Shi, *et al.* Root system distribution characteristics of plants on the terrace banks and their impact on soil moisture [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **15**(3): 500–506.
- [14] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 等. 长白山几种主要森林群落木本植物细根生物量及其动态[J]. 生态学报, 2006, **26**(9): 2855–2862.
GUO Zhongling, ZHENG Jinping, MA Yuandan, *et al.* A preliminary study on fine root biomass and dynamics of woody plants in several major forest communities of Changbai Mountain, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26**(9): 2855–2862.
- [15] GWENZI W, VENEKLAAS E J, HOLMES K W, *et al.* Spatial analysis of fine root distribution on a recently constructed

- ecosystem in a water-limited environment [J]. *Plant Soil*, 2011, **344**(1/2): 255 – 272.
- [16] GILL R A, JACKSON R B. Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems [J]. *New Phytol*, 2000, **147**(1): 13 – 31.
- [17] 韦艳葵, 贾黎明, 王玲, 等. 地下滴灌条件下杨树速生丰产林林木根系生长特性[J]. *北京林业大学学报*, 2007, **29**(2): 34 – 40.
- WEI Yankui, JIA Liming, WANG Ling, *et al.* Characteristics of root growth in fast-growing and high-yield poplar plantations under subsurface drip irrigation [J]. *J Beijing For Univ*, 2007, **29**(2): 34 – 40.
- [18] 傅建平, 兰再平, 孙尚伟, 等. 地面滴灌对 107 杨人工林根系分布的影响[J]. *林业科学研究*, 2013, **26**(6): 766 – 772.
- FU Jianping, LAN Zaiping, SUN Shangwei, *et al.* A study on distribution of root system of *Populus × euramericana* cv. ‘74 /76’ plantation with ground drip irrigation [J]. *For Res*, 2013, **26**(6): 766 – 772.
- [19] 傅建平, 兰再平, 孙尚伟, 等. 滴灌条件下杨树人工林土壤的水分运移[J]. *林业科学*, 2013, **49**(6): 25 – 29.
- FU Jianping, LAN Zaiping, SUN Shangwei, *et al.* Soil water movement in a poplar plantation under drip irrigation [J]. *Sci Silv Sin*, 2013, **49**(6): 25 – 29.
- [20] BLOCK R M A, van REES K C J, KNIGHT J D. A review of fine root dynamics in *Populus* plantations [J]. *Agrofor Syst*, 2006, **67**(1): 73 – 84.
- [21] 杨秀云, 韩有志, 武小钢. 华北落叶松林细根生物量对土壤水分、氮营养空间异质性改变的响应[J]. *植物生态学报*, 2012, **36**(9): 965 – 972.
- YANG Xiuyun, HAN Youzhi, WU Xiaogang. Response of fine root biomass to changes in spatial heterogeneity of soil moisture and nitrogen in *Larix principis-rupprechtii* forest [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2012, **36**(9): 965 – 972.
- [22] 闫小莉, 戴腾飞, 贾黎明, 等. 欧美 108 杨细根形态及垂直分布对水氮耦合措施响应[J]. *植物生态学报*, 2015, **39**(8): 825 – 837.
- YAN Xiaoli, DAI Tengfei, JIA Liming, *et al.* Responses of the fine root morphology and vertical distribution of *Populus × euramericana* ‘Guariento’ to the coupled effect of water and nitrogen [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, **39**(8): 825 – 837.
- [23] 闫美芳, 张新时, 周广胜, 等. 不同树龄杨树人工林的根系呼吸季节动态[J]. *生态学报*, 2010, **30**(13): 3449 – 3456.
- YAN Meifang, ZHANG Xinshi, ZHOU Guangsheng, *et al.* Seasonal dynamics of root respiration in poplar plantations at different developmental stages [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(13): 3449 – 3456.
- [24] 杨秀云, 韩有志, 张云香. 距树干不同距离处华北落叶松人工林细根生物量分布特征及季节变化[J]. *植物生态学报*, 2008, **32**(6): 1277 – 1284.
- YANG Xiuyun, HAN Youzhi, ZHANG Yunxiang. Effects of horizontal distance on fine root biomass and seasonal dynamics in *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2008, **32**(6): 1277 – 1284.
- [25] 谢明明, 郭素娟, 宋影, 等. 板栗细根的空间分布格局及季节动态[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, **35**(1): 60 – 67.
- XIE Mingming, GUO Sujuan, SONG Ying, *et al.* Spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots of *Castanea mollissima* [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2018, **35**(1): 60 – 67.
- [26] 权伟, 余少娜, 王国兵, 等. 武夷山不同海拔植被土壤细根比根长季节动态[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2011, **35**(6): 139 – 142.
- QUAN Wei, YU Shaona, WANG Guobing, *et al.* Seasonal variations of fine root special root length along an elevation gradient in the Wuyi Mountains of southeastern China [J]. *J Nanjing For Univ Sci Ed*, 2011, **35**(6): 139 – 142.
- [27] 甘雅文, 李隆, 李鲁华, 等. 新疆核桃与小麦间作系统种间根直径及比根长空间分布特征[J]. *西北农业学报*, 2015, **24**(5): 56 – 63.
- GAN Yawen, LI Long, LI Luhua, *et al.* Spatial distribution of root diameter and specific root length in walnut/wheat agroforestry system in southern Xinjiang [J]. *Acta Agric Boreali-occident Sin*, 2015, **24**(5): 56 – 63.
- [28] 程云环, 韩有志, 王庆成, 等. 落叶松人工林细根动态与土壤资源有效性关系研究[J]. *植物生态学报*, 2005, **29**(3): 403 – 410.
- CHENG Yunhuan, HAN Youzhi, WANG Qingcheng, *et al.* Seasonal dynamics of fine root biomass, root length density, specific root length and soil resource availability in a *Larix gmelini* plantation [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2005, **29**(3): 403 – 410.